

**В.И. ВОРОНИН\***, **В.С. АНТИПИН\*\***, **В.А. ОСКОЛКОВ\***, **А.М. ФЁДОРОВ\*\*\***

\*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Россия, bioin@sifibr.irk.ru, vosk@sifibr.irk.ru

\*\*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия, antipin@igc.irk.ru, sashaf@igc.irk.ru

\*\*\*Педагогический институт Иркутского государственного университета,  
664011, Иркутск, ул. Нижняя набережная, 6, Россия, sashaf@igc.irk.ru

### ВОЗРАСТ ПАТОМСКОГО КРАТЕРА: ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*По данным дендрохронологических исследований лиственниц, произраставших на Патомском кратере (Иркутская область, Бодайбинский район) и вблизи его основания, начальный период образования кратера можно отнести к концу XV–началу XVI в. В 1841–1842 гг. исследуемые деревья зафиксировали в годичных кольцах событие катастрофического характера, которое вызвало нарушение их корневых систем, повреждение стволов деревьев, образование креновой древесины (compression wood). Очевидно, это событие связано со временем образования позднего кольцевого вала, на котором редкие деревья лиственницы имеют возраст 93–101 год, а на центральной горке, образовавшейся при завершении формирования кратера, возраст самого старого дерева составляет 71 год. Таким образом, дендрохронологическими исследованиями подтверждается длительное и многоактное формирование Патомского кратера. Становление насыщенного конуса в отдельные периоды происходило с разной интенсивностью, проявляя иногда взрывной характер. С помощью рентгенофлуоресцентного анализа установлено двукратное обогащение Sr древесины лиственницы в период значительной активности формирования кратера (1852–1859 гг.), когда из магматического источника могли поступать глубинные флюиды в верхние горизонты земной коры при внедрении магмы в водосодержащие породы. Эти флюиды были насыщены CO<sub>2</sub> и переносили значительные количества Sr, в результате чего отношения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr для карбонатных и терригенных пород возрастали в песчаниках и сланцах на раннем кольцевом валу Патомского кратера. Полученные результаты в совокупности с геологическими данными дают основание утверждать, что Патомский кратер образовался в результате фреатического (парового) взрыва, который произошёл либо при внедрении магмы в водосодержащие породы, либо вследствие разлома и декомпрессии нагретых водосодержащих пород.*

**Ключевые слова:** формирование Патомского кратера, дендрохронологический и рентгенофлуоресцентный анализ.

**V.I. VORONIN\***, **V.S. ANTIPIN\*\***, **V.A. OSKOLKOV\***, **A.M. FEDOROV\*\*\***

\*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 132, Russia, bioin@sifibr.irk.ru, vosk@sifibr.irk.ru

\*\*Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Favorskogo, 1a, Russia, antipin@igc.irk.ru, sashaf@igc.irk.ru

\*\*\*Pedagogical Institute, Irkutsk State University,  
664011, Irkutsk, ul. Nizhnyaya Naberezhnaya, 6, Russia, sashaf@igc.irk.ru

### THE AGE OF THE PATOMA CRATER: DENDROCHRONOLOGICAL AND BIOGEOCHEMICAL INVESTIGATIONS

*According to data of dendrochronological investigations of larch trees that had grown on the Patoma crater (Irkutsk oblast, Bodaibinskii district) and near its base, the initial period of the formation of the crater can be dated back to the late 15<sup>th</sup>–early 16<sup>th</sup> centuries. In 1841–1842, the trees under investigation recorded in annual rings a catastrophic event which caused a disturbance to their root systems, damage to tree stems, and the formation of compression wood. It is obvious that the event is associated with the time of formation of a late circular wall on which sparse larch trees are 93–101 years of age, and on the middle mound emerging upon completion of the formation of the Patoma crater the age of the oldest tree is 71 years. Thus dendrochronological investigations confirm a long-lasting and multievent formation of the Patoma crater. In some periods, the deposition cone was evolving with a different intensity, sometime showing an explosive character. X-ray fluorescent analysis revealed a double Sr enrichment of larch wood at the time of significant activity of crater formation (1852–1859) when plutonic fluids*

*from the igneous source were able to enter the upper horizons of the Earth's crust at the time of magma intrusion into water-containing rocks. The fluids were enriched with CO<sub>2</sub> and transported significant amounts of Sr, as a result of which the <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios in carbonate and terrigenous rocks assumed higher values in sandstone and slatestone on the early circular wall of the Patoma crater. The findings, coupled with geological data, suggest that the Patoma crater emerged as a result of a phreatic explosion that occurred either at the time of magma intrusion into water-containing rocks or as a consequence of the fault and decompression of heater water-containing rocks.*

**Keywords:** *formation of the Patoma crater, dendrochronological and X-ray fluorescence analysis.*

## ВВЕДЕНИЕ

Патомский кратер, расположенный в Бодайбинском районе Иркутской области (Восточная Сибирь, 59°17' с. ш., 116°35' в. д.), был обнаружен в середине XX в. геологом В.В. Колпаковым, который предположил его метеоритное происхождение [1] (рис. 1).

Эта гипотеза была поддержана А.М. Портновым, который в своих публикациях подчеркивал, что кратер образовался в результате падения фрагмента Тунгусского метеорита в сибирской тайге 30 июня 1908 г. [2, 3]. Однако в 1963 г. Сибирская комиссия по метеоритам СО АН СССР выполнила ряд комплексных исследований на кратере и пришла к выводу о неоднозначности и сложности процессов образования кратера, по сути «закрыв» его метеоритное происхождение. Иной взгляд на происхождение кратера высказал С.В. Обручев, предположив, что он мог образоваться в результате прорыва со значительных глубин газопаровой струи на участке, ослабленном тектоническими разломами. Таким образом, к настоящему времени сформулированы две гипотезы происхождения Патомского кратера.

В 2006 и 2008 гг. было проведено комплексное изучение Патомского кратера с участием сотрудников Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета, Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН, астрономической обсерватории Иркутского государственного университета и др. В ходе этих работ впервые была составлена геологическая карта и получены результаты геологических, петрографических и геохимических исследований пород кратера и его обрамления, которые позволили сделать вполне определенные выводы об условиях формирования этого загадочного конуса. Однако особенно важным представлялся вопрос о времени образования Патомского кратера, поскольку от этого зависела жизнеспособность гипотезы о роли космических событий и непосредственно тунгусского небесного тела в формировании кратера. Наиболее точный ответ на этот вопрос могли дать только дендрохронологические исследования, тем более что вокруг кратера и на его склонах произрастали деревья (см. рис. 1). Результатам определения возраста Патомского кратера, дендрохронологических и геохимических исследований в его пределах и прилегающем окружении посвящена данная статья.



Рис. 1. Вид на Патомский кратер с вертолета (хорошо видны деревья, растущие на кратере) (фото С.А. Язева).

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для дендрохронологического анализа в 2006 и 2008 гг. было отобрано 30 спилов стволов лиственницы на центральной горке, на склоне кратера, у его подножия и на некотором удалении. Кроме того, было отобрано 40 буровых кернов наиболее возрастных деревьев лиственницы в окружающей тайге для установления максимального возраста деревьев первого яруса и для точной календарной датировки образцов древесины, отобранных у сухостойных деревьев.

Дендрохронологические исследования проводились по общепринятой методике [4]. По отобранным образцам древесины после измерения ширины годичных колец с применением автоматизированной системы LINTAB (Frank Rinn-Rinntech, Германия) были построены индивидуальные древесно-кольцевые хронологии (ИДКХ), которые датировались методом перекрестной датировки (cross-dating) в программном пакете TSAP [5]. В процессе перекрестной датировки устанавливалась точная календарная дата каждого годичного кольца исследуемых ИДКХ. Стандартизация абсолютных (измеренных) величин радиального прироста, представляющая собой процедуру подавления эффекта возрастной кривой роста фильтрацией низкочастотной составляющей в многолетних колебаниях прироста, осуществлялась программой R из программного пакета Detrender [6].

Датировка деревьев, поваленных и наклоненных экзогенными воздействиями, а также датировка замещения боковыми ветвями обломанного ствола деревьев производилась по времени начала формирования креновой древесины. В результате наклона или изгиба стволов и ветвей деревьев начинают формироваться эксцентричные годичные кольца. У хвойных деревьев эксцентричность выражается в преимущественном развитии креновой древесины (более широкой части годичного кольца) в сторону наклона ствола [7]. Как правило, креновая древесина появляется на следующий год после механического воздействия.

Был принят во внимание опыт применения дендрохронологического анализа для датирования сильных землетрясений в историческом прошлом на Горном Алтае [8], позаимствованный из мировой сейсмологической практики датирования землетрясений, в которой использовалось несколько аспектов дендрохронологического анализа. Для датирования разрывных нарушений проводилось датирование первичных дендросейсмологических свидетельств — разрывов стволов, корней деревьев, а также крена и вывала деревьев в зоне поверхностных сейсморазрывов; датирование вторичных свидетельств — начала замедленного роста и/или гибели деревьев вдоль сейсморазрывов, что связано с полной или частичной потерей кроны в результате сотрясения поверхности. Для датирования оползней и обвалов с доказанной сейсмической природой формирования изучалась древесина деревьев-свидетелей, произрастающих непосредственно на теле оползня (начало формирования креновой древесины соответствует времени сейсмособытия); определялся минимальный возраст обвала/оползня (по возрасту самого старого дерева, выросшего на теле обвала либо стенке его отрыва); устанавливалась точная дата подвижки (по времени гибели погребенных обвалом/оползнем деревьев) [9].

Предполагается, что древесина в момент своего возникновения консервирует в себе элементный состав текущего окружения, поэтому, сопоставляя данные элементного состава с дендрохронологической датировкой, можно восстановить биохимическую и геохимическую историю локального окружения дерева и найти отклики на эпизодические события (лесные пожары, вулканические извержения и пр.), произошедшие в месте произрастания.

Для определения элементного состава древесины лиственницы был проведен сканирующий рентгенофлуоресцентный анализ образца древесины живого дерева, произраставшего у подножия внешнего склона Патомского кратера. Годичный прирост дерева происходил в период с 1826 по 2006 г., т. е. исследуемый образец перекрывает 180-летний отрезок времени. Эксперименты проводились на станции рентгенофлуоресцентного анализа Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск) с использованием синхротронного излучения (коллайдер ВЭПП-3, энергия возбуждающего излучения 5 кэВ, шаг сканирования 0,5 мм; оператор А.Д. Шапоренко).

По результатам измерений были получены профили концентраций следующих элементов: Cl, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Br, Rb, Sr, Y, Ba, Pb — по длине образца. Концентрации элементов выражены в относительных единицах. Это означает, что показатели концентрации стронция, например, на всем временном протяжении можно сравнивать только между собой. Получаемые в измерениях данные по комптоновскому рассеянию обеспечивают дополнительную информацию о локальной плотности древесины, которая хорошо визуализирует положение годичных колец и позволяет точно связать флуоресцентные данные с обычным оптическим изображением и, соответственно, с дендрохронологической информацией (структура годичных колец и перекрестное датирование).



СТРОЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД ПАТОМСКОГО КРАТЕРА

Размеры основания конуса в проекции на горизонтальную плоскость составляют (150–160) × (120–130) м (рис. 2). Диаметр кольцевого вала, окаймляющего воронку, — 80 м, а ее глубина — 12–15 м. Диаметр основания центральной горки кратера — около 34 м. Максимальный перепад высот на кольцевом валу — 15 м, а высота вала над склоном сопки варьирует от 10–12 до 35–38 м.

Неоднородное строение Патомского кратера, установленное при его картировании (см. рис. 2), проявляется в хорошо выраженной зональности и чередовании его главных структурных элементов: внешнего склона конуса, кольцевого вала, кольцевого рва и центральной горки. Кратер расположен среди терригенно-карбонатных пород мариинской свиты неопротерозоя и представляет собой насыпной конус, сложенный преимущественно известняками, а также терригенными породами: песчаниками, кварцевыми песчаниками, метаморфизованными сланцами, карбонатными (иногда с муско-

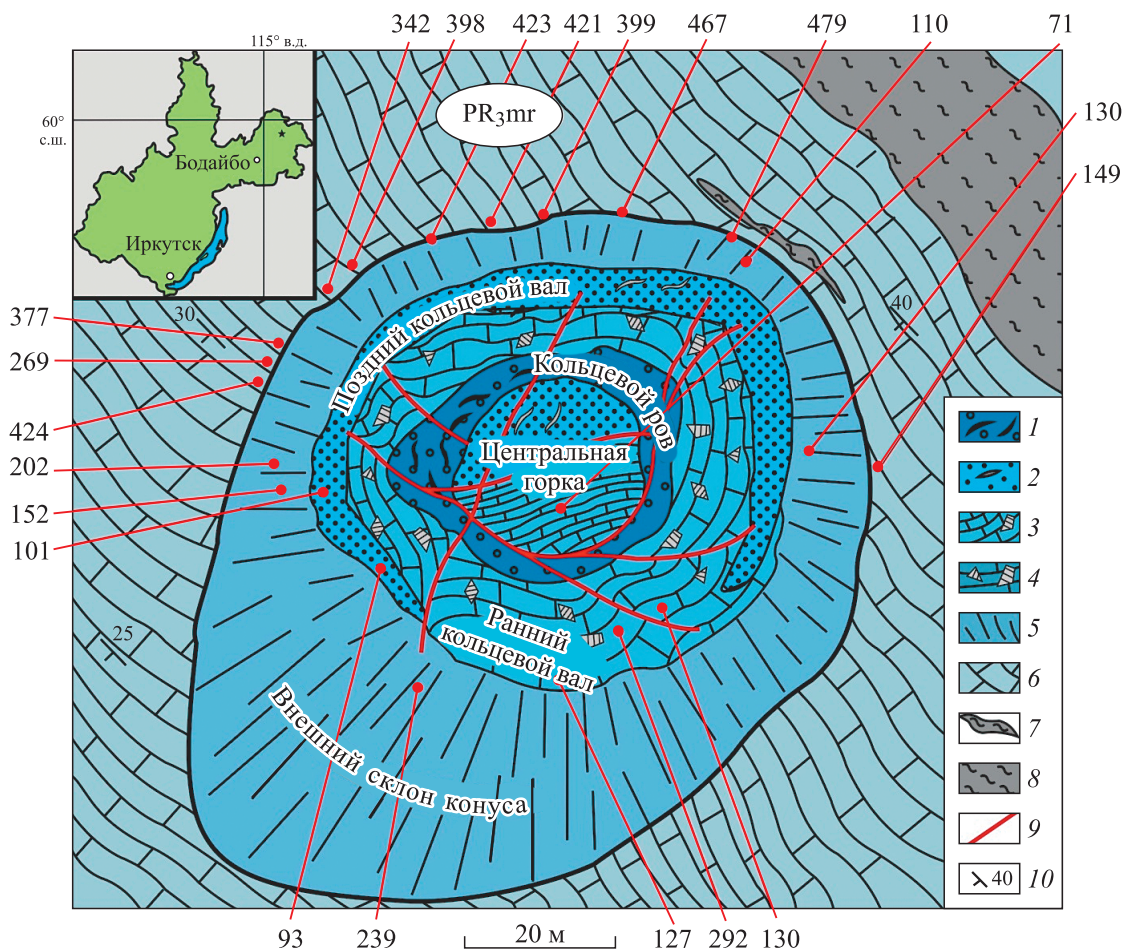


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Патомского кратера м-ба 1:500 (авторы В.С. Антипин, А.М. Фёдоров).

1 — массивные кристаллические известняки с кварц-мусковит-карбонатными жилами (кольцевой ров); 2 — массивные мелкозернистые кристаллические известняки с жилами кварца (поздний кольцевой вал и центральная горка); 3 — существенно выветрелые известняки с редкими глыбами метаморфизованных песчаников и сланцев (центральная горка); 4 — существенно выветрелые известняки с дресвой этих пород и глыбами метаморфизованных песчаников и сланцев (ранний кольцевой вал); 5 — осыпь глыб различных горных пород внешнего склона конуса; 6 — вмещающие кратер известняки мариинской свиты протерозоя; 7 — прослой метаморфизованных песчаников среди известняков; 8 — метаморфизованные песчаники; 9 — кольцевые и радиальные зоны разломов в пределах кратера; 10 — элементы залегания горных пород. Звездочкой на врезке показано место расположения Патомского кратера. На поля рисунка вынесены значения возраста (лет) лиственниц в пределах кратера и в его окружении.

витом, флюоритом) и кварцевыми жилами. Было установлено, что наиболее возвышенная часть кратера — кольцевой вал — разделена неглубоким понижением в рельефе на две части, которые формировались в разное время. На раннем этапе образовался внутренний кольцевой вал, сложенный пластинчатыми, значительно выветрелыми серыми известняками, в которых отмечаются жилы молочно-белого кварца. В этой части кольцевого вала среди известняков встречаются единичные глыбы метаморфизованных сланцев и песчаников, а дресва этих карбонатных и терригенных пород часто покрыта мхом, и на них растут отдельные лиственницы. Внешний, более поздний кольцевой вал, в отличие от внутренней его части, не содержит глыб терригенных пород и сложен темно-серыми массивными кристаллическими известняками, практически не подвергшимися процессам выветривания. Становление Патомского кратера, по-видимому, завершилось формированием центральной горки (см. рис. 2), которая в районе ее вершины представлена массивными кристаллическими известняками, затронутыми процессами выветривания в минимальной степени.

По результатам выполненного в Институте геохимии СО РАН анализа впервые получен химический состав всех главных типов пород, встреченных на Патомском кратере, и вмещающей его терригенно-карбонатной мариинской свиты. Преобладающие здесь карбонатные породы соответствуют среднему составу типичных известняков с содержанием CaO выше 50 %. Содержание SiO<sub>2</sub> в них обычное для этого типа пород и лишь несколько повышенное в известняках раннего кольцевого вала (4,45 %) по сравнению с другими частями насыпного конуса. Содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в известняках в среднем около 1,5 %, а MgO — не превышает 1 %. В целом можно констатировать, что карбонатные породы из всех зон кратера, а также известняки из вмещающей толщи по среднему химическому составу существенно не различаются.

Наибольший интерес в отношении вещественного состава и геохимических особенностей представляют отдельные глыбы песчаников и сланцев внутри насыпного конуса, вынесенные из более глубоких горизонтов при формировании раннего кольцевого вала. Вследствие процесса существенной карбонатизации в них резко возросло содержание CaO (до 11,63 % в песчаниках и 18,04 % в сланцах) по сравнению с этими же породами во вмещающей толще (в среднем 3,01 % в песчаниках и 1,65 % в сланцах), а также Sr. Например, в отдельных округлых глыбах («бомбах») песчаников концентрация Sr достигает 810 г/т по сравнению с его средним содержанием (176 г/т) во вмещающих песчаниках, а в вынесенных с глубины сланцах — 680 г/т относительно средней концентрации (406 г/т) во вмещающих кратер сланцах.

Концентрации других литофильных, халькофильных и сидерофильных элементов в известняках мариинской свиты и в этих же породах в пределах Патомского кратера различаются мало [11]. Важно отметить, что низкие средние концентрации Ni в карбонатных породах различных зон кратера (1,9–3,5 г/т) и вмещающей мариинской свиты (3,9 г/т) исключают метеоритную природу насыпного конуса.

### ВОЗРАСТ ПАТОМСКОГО КРАТЕРА

Для выяснения условий формирования Патомского кратера принципиальное значение имеет его возраст. С целью дендрохронологического анализа участниками экспедиции в 2006 г. были спилены 10 деревьев лиственницы даурской как непосредственно на насыпном конусе, так и вблизи него. В 2008 г. к их числу были добавлены спилены еще 20 деревьев. Полученные по всей совокупности деревьев древесно-кольцевые серии были перекрестно датированы, и на базе этого был установлен абсолютный календарный возраст каждого дерева.

Первоначально на основании имевшихся дендрохронологических данных, полученных по образцам древесины в 2006 г., был сделан вывод о том, что внешняя осыпь кратера образовалась не позже 1770 г., так как в это время на ней появилось самое старое дерево из найденных, и возраст осыпи раннего вала оценивался нами от 250 до 300 лет [12]. В 2008 г. нами был предпринят массовый отбор спилов практически всех наиболее высоковозрастных лиственниц в нескольких метрах от внешней осыпи кратера с северной ее стороны, которая здесь сложена массивными кристаллическими известняками позднего кольцевого вала, где такие деревья сохранились в массе. Многие из этих деревьев имели наклоны ствола, а одно из них лежало на внешней осыпи, оставаясь живым, поскольку часть корней находилась в почве.

Среди этих деревьев доминируют представители возрастной группы в диапазоне 400–480 лет. Тщательные поиски более старых деревьев не дали результата, хотя в таких условиях возраст листвен-

ницы в 600 лет является обычным, а в ряде случаев он может достигать 900–1100 лет [13]. Вполне обоснованно можно предположить, что примерно 500 л. н. в результате активной подвижки грунта произошел массовый вывал деревьев, после которого появилось новое поколение лиственниц, чей возраст составляет сейчас 400–480 лет. В таком случае в настоящее время период образования кратера можно отнести к концу XV–началу XVI в. На самом же сооружении внешней осыпи кратера и раннем кольцевом валу деревья представлены немногочисленными экземплярами и наиболее старые из них появились примерно 300 л. н. Следует отметить, что большинство деревьев, расположенных вблизи северного окончания осыпи, имеют различные аномалии ширины годичного кольца, наклоны ствола или следы механических повреждений (обломы стволов и ветвей, шрамовые следы на стволах от ударов камнями) в период 1841–1842 гг.

Очевидно, в это время исследуемые деревья зафиксировали в годичных кольцах экзогенное событие катастрофического характера, вызвавшее различные их повреждения. Возможность такого серьезного повреждения деревьев в результате лесного пожара полностью исключена ввиду отсутствия соответствующих поражений стволов. Наиболее вероятной причиной воздействия на деревья в районе Патомского кратера является мощная подвижка грунта в эти годы, которая вызвала нарушение корневых систем деревьев, в результате чего одни из них накренились, другие получили механические повреждения, а у части деревьев очень резко снизился радиальный прирост.

Отметим, что в Сибири похожим образом, с помощью дендрохронологического анализа, уже осуществлялась датировка землетрясений по времени гибели деревьев и формирования креновой древесины у деревьев в зонах сейсмогенных разрывов в Становом нагорье [14].

Наибольший интерес представляет группа деревьев 1, 2, 4 (рис. 3), которые находились на участке контакта прилегающей территории и нижней кромки осыпи внешнего кратера. Дерево 2, у подножия кратера, прямостоящее, с обломанной вершиной, было сухостойным. С 1843 г. оно имело резкий спад прироста и погибло в 1876 г. На двух остальных деревьях наблюдались следы механических повреждений. Ствол дерева 1 лежал на нижней части осыпи кратера, а половина его корней находилась в грунте и поддерживала его жизнедеятельность. В 1842 г. оно имело очень узкое годичное кольцо, начиная с 1843 г. стало образовывать креновую древесину. Дерево 4, в одном метре от подножия кратера, живое, прямостоящее, было представлено тремя стволами, которые образовались из



Рис. 3. Древесно-кольцевые хронологии деревьев 1, 2 и 4.

Пояснение — см. текст.



нижних ветвей, взамен сломленного в давние времена ствола. Спил одного из этих стволов и был взят для дендрохронологического анализа.

Все эти деревья объединяет событие, произошедшее в 1842 г., которое радикально изменило характер прироста дерева 1, привело к гибели дерева 2 и в результате которого был обломан ствол дерева 3.

При перекрестной датировке ИДКХ дерева 2 было установлено, что оно погибло в 1876 г., но перед гибелью происходил длительный пролетальный спад прироста — с 1842 г. Причем этот спад носил очень резкий характер. Дерево 1 в 1842 г. имело чрезвычайно низкий прирост, далее в результате наклона ствола у него началось образование креновой древесины. Годичное кольцо с креновой древесиной позволяет точно определить дату наклона.

Ствол дерева 4 также в 1842 г. имел низкий прирост, после чего и у него началось образование креновой древесины. Таким образом, у трех деревьев в годичных кольцах зафиксировано некое событие катастрофического характера, вызвавшее различные их повреждения. К таким повреждениям могли привести пожар или механическое воздействие (лавины, сель, камнепад, ветровал, снеголом, смещения грунта). Пожарное повреждение в данном случае с большой уверенностью можно исключить, поскольку никаких его следов (пожарные подсушины ствола) на этих деревьях, как, впрочем, и на остальных, обнаружено не было. Также практически исключены в этом месте лавинно-селевые проявления из-за небольшой высоты кратера.

Похожая ситуация была отмечена для деревьев сосны желтой (*Pinus ponderosa*), произраставших на достаточном удалении при извержении вулканов Сансет (Аризона, США) [15] и Парикутин (Мексика) [16], которые не погибли, но получили различные механические повреждения, в частности обломы многих ветвей из-за падения вулканического пепла. В результате на следующий после извержения год у них резко снизился радиальный прирост, и восстановление его до среднего уровня заняло несколько десятилетий.

Учитывая расположение рассматриваемой группы деревьев у подножия склона кратера, наиболее вероятной причиной их повреждений следует считать именно значительные подвижки грунта во время нагромождения поздней порции глыбового материала внешнего вала, а облом стволов деревьев и шрамы на их стволах произошли вследствие удара глыб, скатившихся по осыпи. Кроме того, меняющаяся интенсивность формирования насыпного конуса приобретала иногда взрывной характер, и в результате разлетающиеся остроугольные обломки пород пробивали стволы лиственниц и иногда застревали в них.

Можно уверенно предположить, что время образования позднего кольцевого вала — 1841–1842 гг. Его формирование происходило более чем через 300 лет после начала становления кратера. Поскольку на центральной горке и позднем валу деревья значительно моложе (71–101 год), логично считать, что эти образования завершали полное формирование насыпного конуса.

Таким образом, результаты дендрохронологического анализа дают нам основания утверждать, что возраст Патомского кратера составляет около 500 лет и его образование не было одномоментным, а сопровождалось постепенным нагромождением глыбового материала горных пород и отдельными взрывами с выбросом их обломков.

### ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ

Дополнительную информацию о происхождении Патомского кратера предполагалось получить с помощью экспериментальной методики рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения. Эту методику стали применять для изучения элементного состава древесины недавно, и поэтому пока нет возможности детекции точных концентраций того или иного элемента, однако тренды изменения концентраций в годичных кольцах деревьев на протяжении его роста хорошо выделяются. Из всего набора полученных элементов наибольший интерес для нашей задачи представляет Sr (рис. 4). Этот элемент является аналогом кальция и легко усваивается растениями (биохимический барьер). В фоновых условиях содержание стронция в древесине минимально. Так, изменение содержания важнейших химических элементов с 1300 по 2000 г. в годичных кольцах лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) с п-ова Таймыр показало, что средняя концентрация элементов в клеточных стенках древесины убывает от Ca к Sr:  $[Ca] > [Mg] > [Ba] > [Sr]$ . Временная динамика этих элементов однотипна: постепенное уменьшение концентрации в годичных кольцах от прошлого к современности [17]. Следовало ожидать, что и у лиственницы с Патомского кратера будет наблюдаться подобное распределение стронция в древесине годичных колец. Однако по результатам

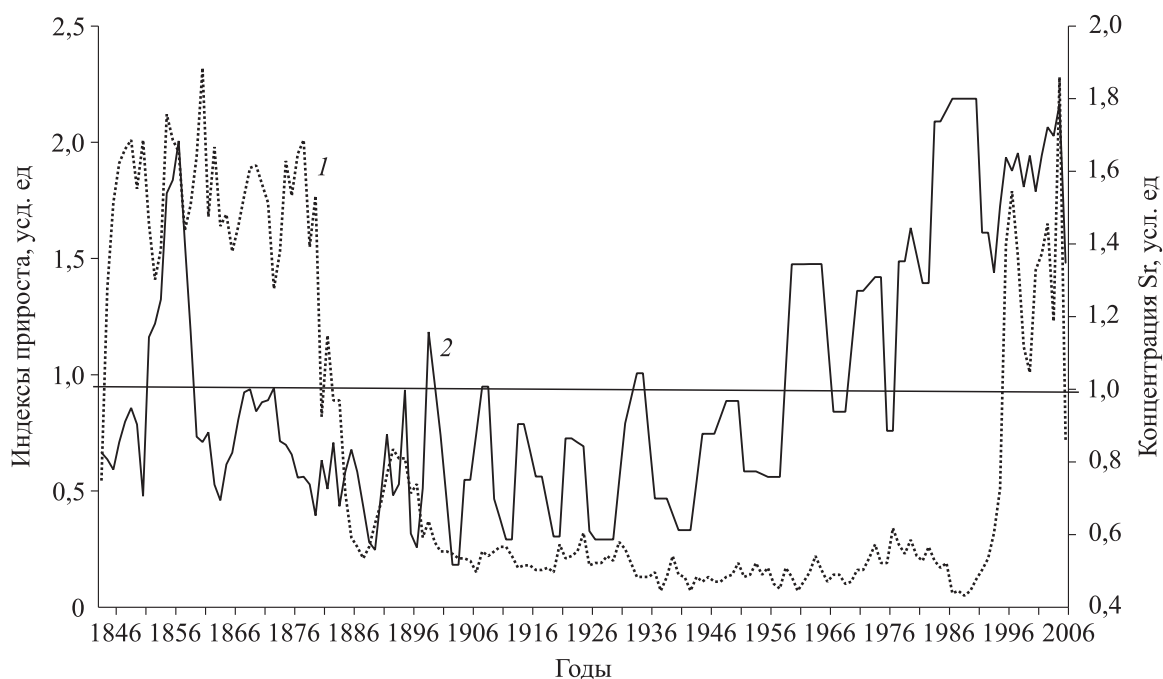


Рис. 4. Динамика радиального прироста (1) и концентрация Sr в годичных кольцах лиственницы (2), произраставшей у подножия Патомского кратера.

Горизонтальная линия — среднее значение концентрации Sr.

рентгенофлуоресцентного анализа древесины лиственницы с Патомского кратера содержание Sr в отдельные периоды времени существенно отличается от фоновых значений.

На рис. 4 обращает на себя внимание двукратное, по сравнению со средним значением, увеличение концентрации Sr в годичных кольцах лиственницы в 1852–1859 гг. По интенсивности оно сравнимо с современным ростом концентрации этого элемента в последние десятилетия, что в определенной степени связано с глобальным выпадением радиоактивных осадков после испытаний ядерных боеприпасов в стратосфере, в частности  $^{90}\text{Sr}$ . Известно, что для этого изотопа выражен кумулятивный характер накопления в древесине [18].

Однако резкий рост концентрации стронция в середине XIX в. требует других объяснений. Существует обстоятельство, которое, на наш взгляд, может объяснить эту аномалию. Известно, что в условиях равновесия чем более нагрет раствор, промывающий карбонатную толщу, тем выше для него отношение Sr/Ca, и повышение температуры подземных вод должно способствовать сильному выщелачиванию Sr из вмещающих карбонатных толщ [19] и повышению его доступности для растений по сравнению с Ca. Напомним, что Патомский кратер сложен в основном известняками, и все терригенные породы кратера обогащены Sr [20].

Отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для известняков Патомского кратера (0,707864–0,708777) находятся в том же интервале, что и для известняков стратотипического разреза мариинской свиты. По сравнению с известняками песчаники и кристаллические сланцы характеризуются большими значениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  вследствие высоких отношений Rb/Sr и большой радиогенной добавки. Вариации изотопного состава стронция в терригенных породах могли быть обусловлены различной степенью их карбонатизации во время длительного формирования насыпного конуса [11].

Ранее было приведено убедительное доказательство взаимодействия карбонатных пород, слагающих Патомский кратер, с горячими водами при температурах не ниже 100 °С, что привело к резкому (в среднем на 6,5 ‰) обеднению их тяжелым изотопом кислорода по сравнению с вмещающими породами мариинской свиты (оценки выполнены Б.Г. Покровским). В совокупности с геологическими данными это дает основание утверждать, что Патомский кратер образовался в результате фреатического (парового) взрыва, который произошел либо при внедрении магмы в водосодержащие породы, либо вследствие разлома и декомпрессии нагретых водосодержащих пород [11].



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате дендрохронологических исследований спилов лиственницы, отобранных непосредственно на Патомском кратере и вблизи его внешней осыпи, установлено, что около 500 л. н. из-за активной подвижки грунта произошел массовый вывал деревьев и появилось их новое поколение с возрастом 400–480 лет. Поэтому начальный период образования кратера можно отнести к концу XV–началу XVI в. На самом насыпном конусе наиболее старые деревья появились примерно 300 л. н. В период 1841–1842 гг. исследуемые деревья зафиксировали в годичных кольцах событие катастрофического характера, которое вызвало нарушение их корневых систем, повреждение стволов деревьев, образование креневого древесина. Очевидно, это событие связано со временем образования позднего кольцевого вала, на котором редкие деревья лиственницы имеют возраст 93–101 год, а на его центральной горке, образовавшейся при завершении формирования кратера, возраст самого старого дерева — 71 год.

Таким образом, по результатам дендрохронологических исследований и анализа возрастных датировок деревьев установлено, что формирование Патомского кратера было длительным и многоактным, определившим его зональное геологическое строение с различиями петрографического и вещественного состава пород отдельных зон, а также их геохимическими особенностями. Становление насыпного конуса в отдельные периоды происходило с разной интенсивностью, иногда носило взрывной характер, что также подтверждается дендрохронологическими данными.

Глыбы терригенных пород (песчаники, сланцы), входящие в состав эруптивной брекчии, интенсивно карбонатизированы и обогащены Са и Sr. Обращает на себя внимание и двукратное обогащение Sr древесины годичных колец лиственницы в период значительной активности формирования кратера, когда из магматического источника могли поступать глубинные флюиды в верхние горизонты земной коры при внедрении магмы в водосодержащие породы. Эти флюиды были насыщены  $\text{CO}_2$  и переносили значительные количества Sr, в результате отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для карбонатных и терригенных пород существенно варьировались [11] и повышались для песчаников и сланцев на раннем кольцевом валу Патомского кратера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колпаков В.В. Загадочный кратер в Патомском нагорье // Природа. — 1951. — № 1–2. — С. 58–61.
2. Портнов А.М. О кратере на Патомском нагорье // Метеоритика. — 1964. — Вып. 25. — С. 194–195.
3. Портнов А.М. Патомский кратер — след Тунгусского явления? // Земля и Вселенная. — 1993. — № 1. — С. 77–81.
4. Cook E.R., Kairiukstis L.A. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. — Dordrecht: Springer Netherland, 1990. — 155 p.
5. Rinn F. TSAP version 3.5. Reference Manual. Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation. — Heidelberg, 1996. — 264 p.
6. Campelo F., García-González I., Nabais C. DetrendeR — A Graphical User Interface to process and visualize tree-ring data using R // Dendrochronologia. — 2012. — Vol. 30, N 1. — P. 57–60.
7. Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. — М.: Наука, 1985. — 208 с.
8. Агатова А.Р., Непоп Р.К., Баринов В.В., Назаров А.Н., Мыглан В.С. Новый аспект применения дендрохронологического анализа для датирования сильных землетрясений прошлого (на примере Горного Алтая) // ДАН. — 2014. — Т. 455, № 2. — С. 175–178.
9. Paleoseismology / Ed. J.P. McCalpin. 2nd ed. — San Diego: Elsevier, 2009. — 613 p.
10. Антипин В.С., Воронин В.И., Фёдоров А.М. Патомский кратер в Восточной Сибири // Природа. — 2008. — № 9. — С. 69–75.
11. Антипин В.С., Покровский Б.Г., Фёдоров А.М. Патомский кратер — результат фреатического взрыва: геологические и изотопно-геохимические свидетельства // Литология и полезные ископаемые. — 2015. — № 6. — С. 538–548.
12. Антипин В.С., Дмитриев А.Г., Язев С.А., Воронин В.И. Патомский кратер в Восточной Сибири: история изучения и результаты комплексных исследований последних лет // 100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее: Тезисы докладов Междунар. конф. (Москва, 26–28 июня 2008 г.). — М.: Изд-во Ин-та динамики геосфер РАН, 2008. — С. 163.
13. Ваганов Е.А., Наурызбаев М.М., Егерь И.В. Предельный возраст деревьев лиственницы в Сибири // Лесоведение. — 1999. — № 6. — С. 65–75.

14. **Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И.** Дендрохронологическое датирование сейсмогенных разрывов в Становом нагорье // Геология и геофизика. — 1982. — № 8. — С. 62–69.
15. **Smiley T.L.** The Geology and Dating of Sunset Crater, Flagstaff, Arizona: New Mexico Geological Society, Ninth field conference guidebook. — Socorro, 1958. — P. 186–190.
16. **Eggler Willis A.** Plant communities in the vicinity of the volcano El Paricutin // Ecology. — 1948. — Vol. 29, N 4. — P. 415–436.
17. **Ваганов Е.А., Грачёв А.М., Шишов В.В., Панюшкина И.П., Левитт С.У., Кнорре А.А., Чебыкин Е.П., Меняйло О.В.** Дендрохронология элементного состава как перспективное направление биогеохимии // ДАН. — 2013. — Т. 453, № 6. — С. 702–706.
18. **Рихванов Л.П., Архангельская Т.А. Замятина Ю.Л.** Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиэкологической ситуации. — Томск: Дельтаплан, 2015. — 148 с.
19. **Wedepohl K.H.** Primaere und diagenetische Strontium gehalte von Karbonatgesteinen // Ber. deutsch. Ges. geol. Wiss. — 1969. — Reihe B, Bd. 14, Hft. I. — S. 17–23.
20. **Антипин В.С., Фёдоров А.М., Дриль С.И., Воронин В.И.** Новые данные о происхождении Патомского кратера (Восточная Сибирь) // ДАН. — 2011. — Т. 440, № 6. — С. 1–5.

*Поступила в редакцию 11.11.2019*

*После доработки 14.01.2020*

*Принята к публикации 25.06.2020*